

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016

Oldřich Lang

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Měření propuštěné energie jističem nn

**Measurement of Let – Trough Energy at
Miniature Circuit Breaker**

Zadání bakalářské práce

Student: **Oldřich Lang**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Měření propuštěné energie jističem nn**
Measurement of Let-Through Energy at Miniature Circuit Breaker

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor, základní popis jističe nn, konstrukční provedení.
3. Propuštěná energie I_{2t} , základní problematika.
4. Provedte měření propuštěné energie I_{2t} na vybraných vzorcích jističů nn pomocí zkratového generátoru.
5. Porovnejte naměřené hodnoty, vyhodnoťte provedená měření.
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje, Praha, 1985, SNTL
- CIGÁNEK, Ladislav. Elektrické přístroje, Praha, 1956, SNTL
- KŘÍŽ, M. Dimenzování a jistění elektrických zařízení, IN-EL, Praha, 2011
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 29.04.2016


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

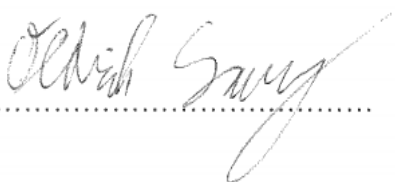



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 15.3.2016



.....

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval mému vedoucímu, Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za spolupráci, odborný dohled a cenné rady po celou dobu vypracovávání této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá základní problematikou energie propuštěné jističem po jeho vypnutí při zkratu v elektrickém obvodu. V této práci jsou obecně popsány části elektrických přístrojů, jejich vlastnosti a předpoklady pro správné fungování pro účely, na které jsou navrženy. Dále se tato práce zaměřuje na problematiku elektrického oblouku, zvláště pak ve vakuu. Druhá část této práce se zabývá základní problematikou Jouleova integrálu. Jsou popsány jeho vlastnosti, které se v praxi využívají. Poslední část práce spočívá v samotném měření energie propuštěné jističem při zkratu vyvolaném impulsním generátorem v laboratoři. Propuštěná energie bude zkoumána v závislosti na tlaku vzduchu, ve kterém se jistič nachází.

Klíčová slova

Elektrický obvod, zkrat, jistič, ochrana elektrického obvodu, elektrický oblouk, proud, napětí, míra propuštěné energie, Jouleův integrál, vakuum, impulsní generátor, okamžité hodnoty

Keywords

Electrical circuit, short – circuit, circuit breaker, protection for electrical circuit, electrical arc, current, voltage, let – through energy, Joule integral, vacuum, pulse generator, instantaneous values

Abstract

This Bachelor thesis deals with basic issue concerning energy, which passes over circuit breaker during short – circuit. In this Bachelor thesis are universally described parts of electrical appliance, their properties and assumptions for correctly working on which are designed. Next part deals with issue electrical arc, especially in vacuum. Another section follows up Joule integral. Its properties used in practice are described. The last part of this Bachelor thesis describes measurement let – through energy. This energy will be examined depending on the air pressure.

Seznam některých použitých zkratk a symbolů

I^2t	Míra propuštěné energie	(A ² s)
I_{kmax}	Maximální zkratový proud	(kA)
I_n	Jmenovitý proud	(A)
R	Elektrický odpor	(Ω)
U_f	fázové napětí	(V)
U_n	Síťové napětí	(V)
W_c	Maximální energie zkratového generátoru	(kJ)
dt	Derivace podle času	(-)
f	Kmitočet	(Hz)
i	Okamžitá hodnota proudu	(A)
i_0, i_D	Omezený proud propuštěný jističem	(A)
mn	malé napětí (do 50 V)	(-)
n	počet	(-)
nn	nízké napětí (50 – 1000 V)	(-)
t	Čas	(s)
t_a	Vypínací doba	(s)
t_l	Doba hoření oblouku	(s)
$u(t)$	Okamžitá hodnota napětí	(V)
vn	vysoké napětí (1 – 52 kV)	(-)
vvn	velmi vysoké napětí (52 – 300 kV)	(-)

Obsah

1. Úvod	10
2. Části elektrického přístroje obecně	11
2.1. Proudové části	11
2.2. Izolace přístroje	11
2.3. Mechanismus.....	11
2.4. Zhášedla.....	11
3. Jističe	12
3.1. Jistič obecně	12
3.2. Malý jistič nn.....	12
3.3. Řez jističem nn	13
3.4. Střední a velké jističe	15
4. Elektrický oblouk	16
4.1. Vlastnosti elektrického oblouku	16
4.2. Vznik oblouku v přístrojích, vypínání přístrojů se spínacími kontakty.....	16
5. Vakuum	17
5.1. Vakuové vypínače	17
5.2. Izolační schopnost vakua.....	17
5.3. Oblouk ve vakuu	17
6. Omezovací schopnost jističe	19
6.1. Míra propuštěné energie	19
7. Měření propuštěné energie	21
7.1. Postup měření	21
7.2. Vyhodnocení měření	24
8. Zhodnocení měření, závěr	34
9. Literatura	36

Seznam tabulek

Tab. 1 - Tabulka hodnot povolené propuštěné energie dle ČSN EN 60 898+A	20
Tab. 2 - Závislost propuštěné energie na tlaku vzduchu	31

Seznam obrázků

Obr. 3.1 - Řez jističem nn.....	13
Obr. 3.2 - Vypínací doby jističů	14
Obr. 3.3 - Výkonový jistič.....	15
Obr. 3.4 - Zhášecí komora výkonového jističe.....	15
Obr. 6.1 - Průběh napětí	19
Obr. 6.2 - Průběh proudu.....	20
Obr. 7.1 - Zkratový generátor.....	21
Obr. 7.2 - Vakuová vývěva s jističem	22
Obr. 7.3 - Klešťový ampérmetr	22
Obr. 7.4 - Měřicí karta National Instruments	23
Obr. 7.5 - Prostředí LabView	23
Obr. 7.6 - Celkový pohled na měřicí ústrojí.....	24
Obr. 7.7 - Průběh proudu a napětí na jističi při atmosférickém tlaku.....	25
Obr. 7.8 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 90 kPa	25
Obr. 7.9 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 80 kPa	26
Obr. 7.10 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 70 kPa	26
Obr. 7.11 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 60 kPa	27
Obr. 7.12 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 50 kPa	27
Obr. 7.13 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 40 kPa	28
Obr. 7.14 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 30 kPa	28
Obr. 7.15 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 20 kPa	29
Obr. 7.16 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 13 kPa	29
Obr. 7.17 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 10 kPa	30
Obr. 7.18 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 2 kPa	30
Obr. 7.19 - Energie propuštěná jističem v závislosti na tlaku vzduchu.....	31
Obr. 7.20 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 13 kPa a maximálním proudu, 1,2 kA	32
Obr. 7.21 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 2 kPa a maximálním proudu, 1,2 kA	33
Obr. 8.1 - Závislost obloukového napětí na tlaku vzduchu.....	34

1. Úvod

Základní myšlenka jisticích a ochranných přístrojů je vytvořit v elektrickém obvodu cíleně nejslabší místo, ve kterém se při zkratu nebo přetížení obvod přeruší. Přerušením elektrického obvodu v bezpečném místě zamezí škodám, které by mohl větší, než jmenovitý proud způsobit. Mohou to být škody způsobené teplem, které proud vytváří, tak škody mechanické.

Nejznámější dva elektrické přístroje, které se v dnešní době využívají, jsou pojistky a jističe. Tato práce se bude zabývat převážně jističi. Jistič chrání elektrický obvod před přetížením i před zkratem. Hlavní výhodou je opakované použití, na rozdíl od pojistek, které jsou pouze jednorázové.

Primárním principem jističe myslíme rozpojení dvou kontaktů uvnitř jističe a následné uhašení elektrického oblouku v zhášecí komoře. Tato práce se bude převážně zabývat právě tímto zhášením oblouku. Rychlost, jakou elektrický oblouk v zhášecí komoře uhasne, souvisí právě s mírou propuštěné energie, která je hlavním tématem práce. Hlavními sledovanými parametry bude napětí oblouku a doba, v které projde střídavý proud poprvé nulovou hodnotou a oblouk tak vyhasne. Plocha pod křivkou proudu se pak bude vyhodnocovat právě jako míra propuštěné energie, I^2t . Jednotkou této energie je A^2s . Pro jističe existují tabulky, kde je přesně udaná hodnota propuštěné energie, která je pro daný typ jističe maximální.

V tomto měření bude použit pouze jeden jistič, a to typ LSE10B s následujícími parametry:

- Jmenovité napětí 400 V
- Jmenovitý proud 10 A
- Jmenovitá zkratová schopnost 6 kA
- Třída selektivity 3
- Vypínací charakteristika B

Při měření bude postupně snižován tlak vzduchu, ve kterém se jistič nachází až do hodnoty 2 kPa. Práce bude zkoumat závislost propuštěné energie právě na okolním tlaku vzduchu.

2. Části elektrického přístroje obecně

2.1. Proudové části

K základním proudovým částem elektrického přístroje patří svorky přístroje, spojovací části a kontakty. Proud má základní dvě vlastnosti, kterými tyto kontakty namáhá. Jsou to tepelné a mechanické účinky.

Tepelné namáhání je trvalé, závisí na velikosti procházejícího proudu. Zvláštní případ nastane při krátkodobém procházení zkratového proudu. Dalším zvláštním případem je také opalování kontaktů, kdy v podstatě dochází k vypařování a odstřikování roztaveného materiálu. Tento děj je způsobený velmi vysokou teplotou při hoření oblouku mezi kontakty přístroje.

Mechanické účinky můžeme rozdělit na dva druhy. První druh namáhání je způsoben provozním spínáním. Zde se vytváří mechanický tah pružin, rozběh a brzdění setrvačných hmotností pohyblivých částí přístroje. Druhým druhem mechanického namáhání je působení elektrodynamických sil při průchodu zkratového proudu. [1], [2]

2.2. Izolace přístroje

Izolační materiály mají jako hlavní úkol upevnění proudovodných částí přístroje s dostatečnou mechanickou pevností a navíc elektricky izolovaně od země nebo od jiné fáze. Při vypnutém stavu navíc zajišťují elektrickou izolaci mezi kontakty. Hlavními parametry pak musí být jednak dostatečné izolační vlastnosti a navíc také dobré rozložení elektrického pole. Pro tyto účely se používají všechny tři druhy skupenství. Plyné skupenství je zastoupeno hlavně vzduchem, ale používají se i zvláštní plyny. Pro kapaliny je nejčastější zastoupení transformátorový olej. Pevné látky se používají jak organické, tak anorganické. [1]

Pevná složka je základní částí přístroje, zajišťuje mechanické spojení, a zároveň elektrické oddělení vodivých částí. Plyný nebo kapalný izolant je pak přítomen tam, kde se odehrává samotné spínání, odděluje kontakty při vypnutém stavu. Jakýkoliv s těchto izolantů pak zajišťuje izolaci vůči zemi. Rozhraní pevného izolantu je často nejslabší částí, protože se na něm hromadí nečistoty a sráží vlhkost, což způsobuje nepříznivé jevy. [1]

2.3. Mechanismus

Mechanismem elektrického přístroje rozumíme jakékoliv zařízení, pomocí kterého přepínáme kontakty s jedné polohy do druhé. Používáme jednoduché mechanismy ovládané přímo rukou nebo izolační rukojetí, nebo pak složitější, většinou elektrické mechanismy používané spíše v sítích vn. K mechanismu vypínače patří také nosný rám, u sítí mn, a nn je převážně izolační, u sítí vn, vvn bývá kovový. [1]

2.4. Zhášedla

Každý elektrický přístroj musí spolehlivě vypnout při daném napětí jakýkoliv proud až do svého jmenovitého proudu. Problém nastává v tom, že vypínací schopnost prosté kontaktní soustavy v běžném ovzduší je poměrně malá, přibližně několik desítek nebo stovek A, podle velikosti napětí. Vypínací schopnost můžeme zlepšit dvěma způsoby. Prvním je změna prostředí mezi kontakty. Místo vzduchu použijeme například plyn s lepšími vlastnostmi (dneska často SF₆), vakuum, nebo například olej. Většího vypínacího proudu ovšem dosáhneme druhým způsobem, a to zavedením zhášedla. Zhášedlo je zařízení, ve kterém vhodným způsobem působíme na oblouk tak, aby při vysokých proudech v řádech desítek kA uhasnul během jedné, nebo maximálně pár setin sekundy. Používáme několik principů zhášedel. Konečným výsledkem je však vždy intenzivní deionizace dráhy oblouku, což způsobí jeho uhašení. [1]

3. Jističe

3.1. Jistič obecně

Pokud uvažujeme ovládání, nebo chránění silnoproudých rozvodů před nežádoucími silovými nebo tepelnými účinky nadproudu nebo podpětí, používáme výhradně samočinné vypínače, právě jističe. Hlavní předností jističe je sloučení funkcí vypínače a pojistky do jednoho přístroje. Můžeme počítat s hodnotami 20 až 100 násobek jmenovitého proudu.

Obecně drží kontakty u sebe zámek, který působí proti síle vypínací pružiny, která se při zapnutí napne. Zámek můžeme uvolnit také ručně pomocí ovládacího mechanismu nebo dálkově elektromagneticky. Při poruše se aktivuje spoušť, která zámek odblokuje a jistič vypne. Spoušť se skládá s proudové dráhy a mechanismu, který může být spuštěn elektromagneticky nebo tepelně. Jistič používáme především v hladinách nn.

Podle jmenovitého proudu dělíme jističe na:

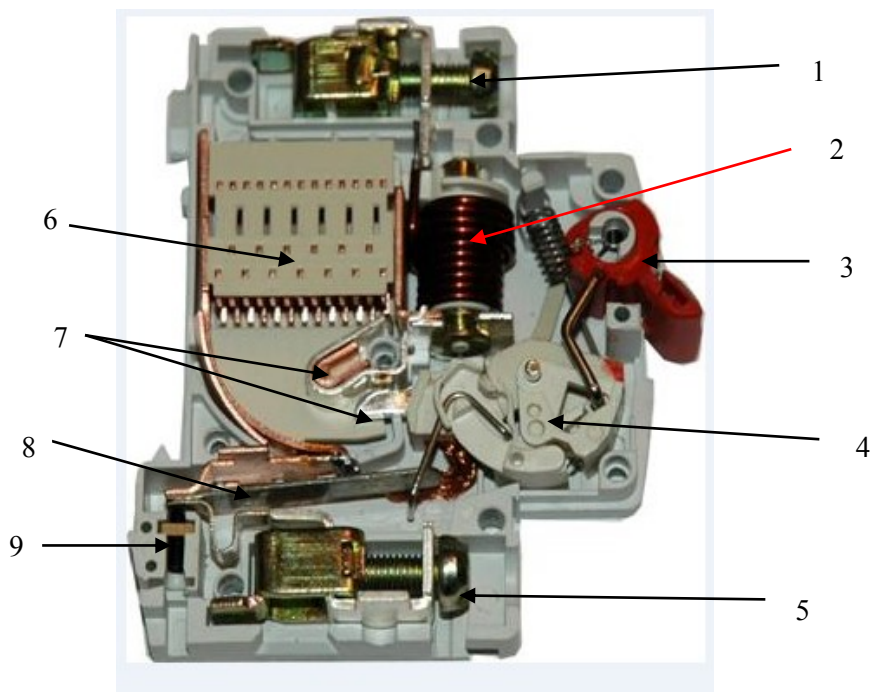
- Malé, s proudem do 63 A
- Střední s proudem 100 až 630 A
- Velké pro proudy 1000 A a vyšší

Nejvíce jsou používány malé jističe pro jištění domovních, kancelářských a podobných zařízení, kde je nejvíce oceněna jeho výhoda spočívající v opakovaném použití. [1], [2]

3.2. Malý jistič nn

Malý jistič je vyráběn v největší míře ze všech jističů. Evropské výrobci vyrábí jistič s jednotnou šířkou 17,5 mm na pól. Základní členění je s jednoduchou nebo můstkovou kontaktní soustavou a dále jedním nebo dvojítm přerušením proudové dráhy. Jako materiál pro kontakty jsou nejčastěji použity slitiny stříbra s malou příměsí materiálů teplotně odolných jako CdO, C, Ni nebo W. Jednotlivé části jsou popsány na Obr. 3.1 [1], [5]

3.3. Řez jističem nn



Obr. 3.1 - Řez jističem nn

1,5 Vstupní a výstupní svorky:

Slouží k připojení vodiče, jsou v plastovém pouzdru pro ochranu údržby proti dotyku živé části.

2 Zkratová indukční spoušť (vystřelovací cívka)

Pokud touto cívkou začne protékat vysoký zkratový proud, indukčnost způsobí "vystřelení" jádra cívky (válečku), který způsobí vybavení volnoběžky a zároveň svou silou urychlí pomocí mechanismu oddálení kontaktů. Kontakty musí zapálit elektrický oblouk nejpozději 5ms od vzniku zkratu

3 Ovládací páčka

Slouží k ručnímu zapnutí a vypnutí přístroje obsluhou.

4 Západkový mechanismus

Udrží kontakty v sepnutém nebo rozepnutém stavu, pokud tento stav nezměníme ručně, nebo samočinnou spouští.

6 Zhášecí komora

Po rozepnutí kontaktů vznikne elektrický oblouk, který je třeba co nejrychleji uhasit. Jistič má roštovou zhášecí komoru, která způsobí, že se jeden velký oblouk rozpadne na několik menších, u kterých vzroste odpor oblouku. To způsobí, že oblouk nedosáhne své amplitudy a rychle se zmenšuje až na nulu, což se jeví jako omezovací schopnost. Počet přepážek je daný vztahem $n \geq 0,05U_f$.

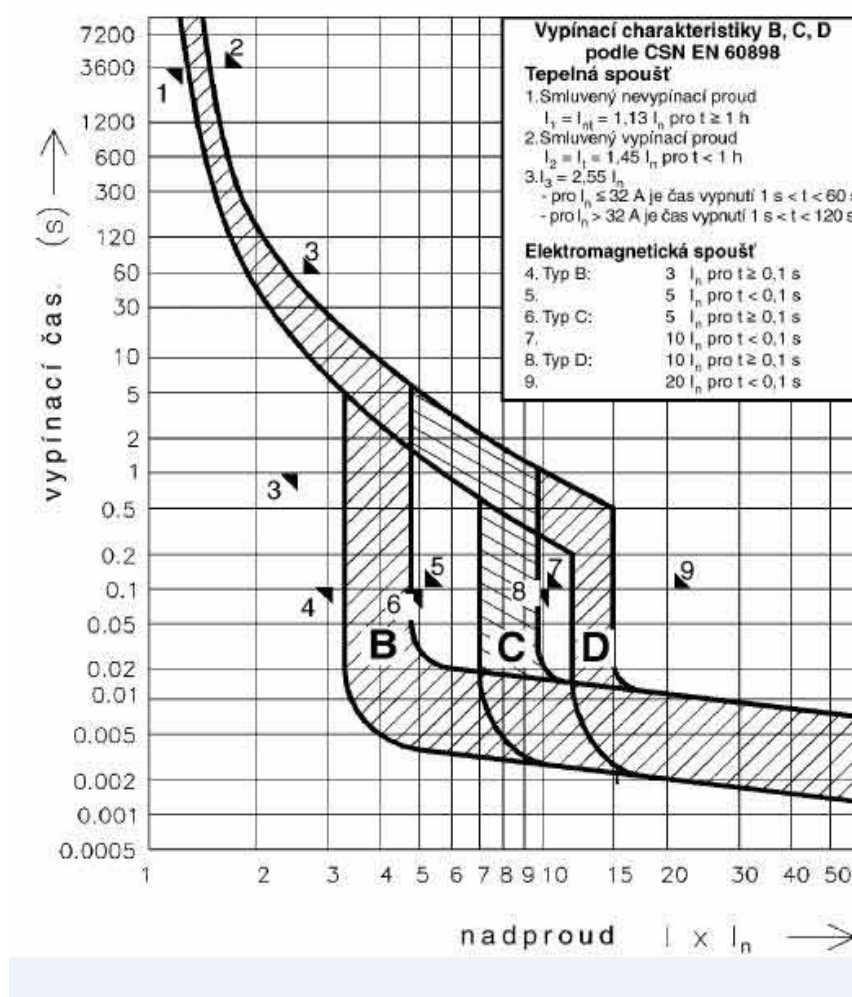
7 Kontakty

Místo, kde dojde k přerušení proudu. Třeba klást důraz na tepelnou a mechanickou odolnost.

8 Tepelná spoušť

Je sestavena se dvou kovových pásků, které mají různý součinitel tepelné roztažnosti. Oba pásky se pevně spojí po celé délce a vznikne dvojkov (bimetal). Pokud začne tímto bimetalem procházet větší hodnota proudu, než jmenovitá, kov se začne vlivem svého činného odporu zahřívat. Pokud se začne bimetal zahřívat, vrstva s větším součinitelem roztažnosti (aktivní vrstva) se začne prodlužovat mnohem více než vrstva druhá. Určitý stupeň ohnutí způsobí rozpojení proudové dráhy a vybavení spouště, které jistič uvede do vypnuté polohy. Po rozpojení bimetal rychle vychladne a je možno jej znova použít. Jako materiál pro pasivní část se používá invar (slitina niklu a oceli s obsahem asi 40% niklu). Pro aktivní část se používá slitina invaru s podstatně menším obsahem niklu a dalšími přísadami (Měď, Mangan, Chrom, Molybden).

Doba, za kterou se jistič vypne pomocí tepelné spouště, závisí od velikosti proudu, od jednotek sekund až po minuty. Podle doby vypnutí pak určujeme charakteristiky jističů B, C, D viz. Obr. 3.2 [4]



Obr. 3.2 - Vypínací doby jističů

Další druhy jističů podle charakteristiky:

Z Pro elektronické obvody pro $I < 1,05 I_n$ jistič nesmí vypnout ($t > 2$ hod.)
pro $I < 1,2 I_n$ jistič musí vypnout ($t < 1$ hod.)

MA Bez ochrany proti přetížení

9 Nastavení tepelné ochrany

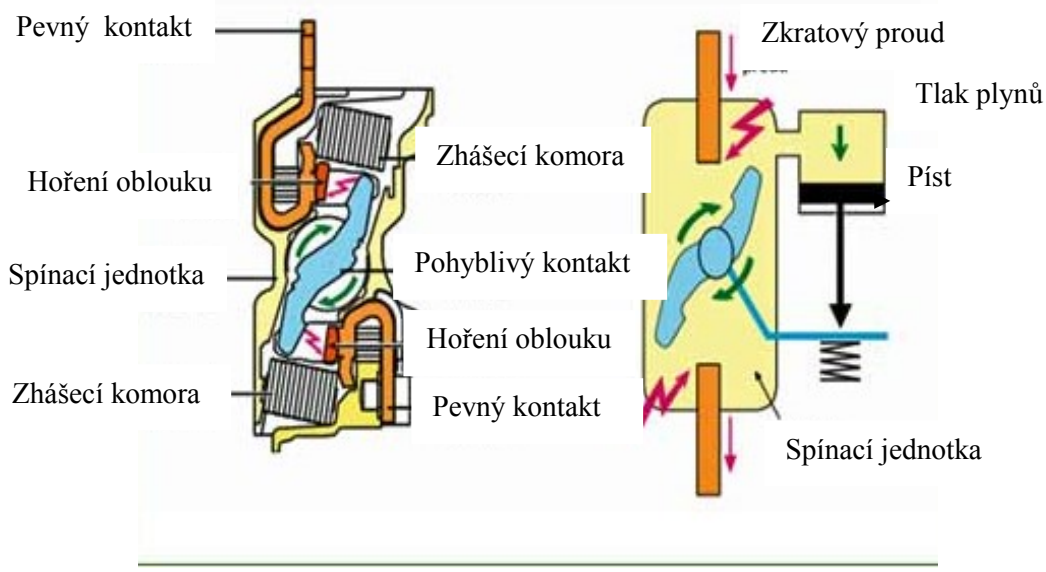
Umožňuje přesné nastavení, kdy má zapůsobit tepelná ochrana. U jističů pro domovní rozvody se používá spíš výjimečně. [3]

3.4. Střední a velké jističe

U středních a velkých jističů máme odlišné materiály pro kontakty. Jsou většinou palcové s čelním stykem. Jednou skupinou jsou měděné materiály se smykovým dosedem, druhou pak stříbrné se ztuženou odolnou složkou. U větších přístrojů používáme dvojdílnou kontaktní soustavu. Stříbrné kontakty slouží k trvalému chodu a krátkodobému přetížení, měděné pak slouží jako opalovací a musí odolat účinkům elektrického oblouku při provozním i zkratovém vypínání. Při zapnutí do zkratu nesmí dojít ke svaření kontaktů. [3]



Obr. 3.3 - Výkonový jistič



Obr. 3.4 - Zhášecí komora výkonového jističe

4. Elektrický oblouk

4.1. Vlastnosti elektrického oblouku

Elektrický oblouk je jeden z druhů elektrických výbojů. Je schopen samostatného hoření, pokud ho vhodným způsobem neuhasíme. Vhodným způsobem je například zavedení zhašedla, které je výše popsáno.

Hlavními znaky elektrického oblouku jsou:

- Vysoká teplota katodové skvrny dostačující k tepelné emisi elektronů
- Hustota proudů katodové skvrny se řádově rovná desítkám mA/m²
- Malé elektrodové úbytky
- Malé napětí mezi elektrodami (vzhledem k napětí zdroje)
- Velký proud procházející obloukem (větší než 1 A)
- Intenzivní vyzařování světla z výbojového plazmatu a z elektrod

Podle druhu napětí se oblouky dělí na oblouk napájený střídavým proudem, a oblouk napájený stejnosměrným proudem. Oblouk se vždy vytvoří přechodem s korony. Doba vytváření oblouku je velmi krátká, řádově 10⁻⁶ s. Po vytvoření je plazma v termické rovnováze, to znamená, že elektrony, ionty, neutrální atomy a popř. molekuly mají stejnou teplotu. Plazma je vyhřáté na vysokou teplotu a je poměrně dobrým vodičem proudu. [1]

4.2. Vznik oblouku v přístrojích, vypínání přístrojů se spínacími kontakty

V zapnutém stavu jsou k sobě kontakty přitlačovány silou pružin, což způsobuje pružně a plasticky deformaci materiálu v místě styku. Protože povrch není rovný, tak proud neprochází celou plochou, ale pouze určitým počtem mikroskopicky malých plošek. Během vypínacího procesu dochází ke zmenšování tlaku na kontakty, zmenšuje se velikost a počet bodových plošek, vzrůstá kontaktní odpor, zvětšuje se ohřívání kontaktních můstků Joulovým teplem. V případě, že materiály kontaktů jsou s nízkou teplotou tavení (měď, stříbro), pak vznikne při odpojení materiálů mikro exploze. Vzniklou tlakovou vlnou se rozloží molekuly v místě odpojení. Vzdálenost mezi konci vodičů je v tomto okamžiku velmi malá, tím pádem intenzita elektrického pole větší než elektrická pevnost a jsou splněny podmínky pro průraz. Poměrně velké množství urychlovaných elektronů vytvoří elektronovou lavinu a vznikne oblouk. V případě, že kontakty jsou vyrobeny z materiálů s vysokou teplotou tavení (wolfram, uhlík), nebo vzniknou můstky s roztaveného kovu, je v místech posledního styku kov vyhřát na teplotu blízkou tavení a ve vyhřátých místech je energie potřebná k uvolnění elektronu malá. Z elektrody, která je v okamžiku rozpojení kontaktů katodou, jsou elektrickým polem vytahovány elektrony a po urychlení vytvoří elektronovou lavinu a vznikne oblouk. V obou případech jsou elektrody na počátku vytváření výboje teplé, proto vznikne oblouk i při nízkých napětích. [1]

5. Vakuum

5.1. Vakuové vypínače

Základní vlastností, které využívají vakuové vypínače je velká rychlost difúze částic ve vakuu. Plazma vypínacího oblouku se následkem rychlých difúzních pochodů ve vakuu roztáhne do velkého průměru a vyplní téměř celý prostor vakuové nádoby, v níž jsou umístěny elektrody vypínače. Koncentrace nabitých částic je tak malá, že oblouk uhasne v první nule proudu. Vakuové vypínače mají nejmenší kontaktní zdvih ze všech druhů vypínačů, nehodí se proto pro vypínání stejnosměrného proudu. Vakuové vypínače se nedají zařadit do skupiny vypínačů s vlastní energií, ani do skupiny vypínačů s cizí energií. Postupně se v technice vyskytují častěji.

Jejich hlavní výhody jsou:

- nehořlavá
- tichá
- nevyfukují ionizované plyny nebo plameny
- mají o jeden až dva řády nižší obloukové napětí, tzn. i zhasací energii
- minimální opotřebení
- malý zdvih

Používají se hlavně ve stykačích nn a vn. [5], [1]

5.2. Izolační schopnost vakua

Pokud snížíme hodnotu tlaku vzduchu pod úroveň minima Paschenova zákona a zachováme vzdálenost mezi kontakty, pak průrazné napětí prudce vzrůstá. Obecně lze říct, že pokud bude tlak vzduchu menší než 10^{-2} Pa, je střední volná dráha elektronů ve zbytkovém plynu značně delší, než vzdálenost kontaktů. To zabrání tomu, že nedojde po přiložení napětí k nárazové ionizaci a tím pádem nemůže nastat samovolný elektrický výboj. Pokud snížíme tlak po 10^{-3} Pa, pak tento stav nazýváme vysoké vakuum. V tomto stavu přestane průrazné napětí záviset na tlaku. Teoreticky je vakuum izolant, ale díky přítomnosti elektrod i zde dochází při určitém napětí k průrazu. Vypínání ve vakuu je i tak velmi odlišné od vypínání v ostatních prostředích, protože elektrody se nachází v nevodivém prostředí, které se prakticky neionizuje. Kontakty ve vakuových vypínačích se pohybují v tlaku 10^{-4} až 10^{-6} Pa. Délka střední volné dráhy molekul zbytkového plynu je o několik řádů delší, než vzdálenost vnitřních rozměrů zhasedel a zároveň největší možná délka vakuového oblouku. [1]

5.3. Oblouk ve vakuu

Při oddalování kontaktů se zmenšuje plocha styku, počet stykových bodů, narůstá teplota kvůli Joulova tepla. Dojde k vypaření části kontaktového kovu a mezi kontakty vznikne mrak kovových par. Poté dojde k ionizaci těchto par a následně přenosu proudu vzniklým plazmatem. Na katodě se vytvoří katodová skvrna s proudovou hustotou 10^3 až 10^4 A/mm². Tato skvrna se stane zdrojem kovových par pro vakuový oblouk. Při hoření unikají do okolního prostoru z trupu jednotlivé ionizované částice, které je nutné doplňovat, proto se musí oblouk stále zásobovat kovovými parami z katodové skvrny. Pokud k tomu nedojde, oblouk ztrácí stabilitu a zaniká. Pokud vakuem prochází střídavý proud, tak katodová skvrna zaniká za dobu asi 10^{-8} s. Atomy kovových par opouštějí prostor mezi kontakty rychlostí 10^3 až 10^4 m/s. Plná elektrická pevnost se obnovuje velmi rychle, v řádech mikrosekund. Rychlé opuštění prostoru vede k značnému urychlení procesu deionizace. Část kovových par kondenzuje na anodě, část kondenzuje na stínících krytech obklopující kontakty. Vypínacími pochody tedy dochází ke ztrátě kontaktního materiálu. Ztráty u běžně používaných materiálů se pohybují okolo 10^{-3} μg/C. Toto bývá často limitující parametr a vakuových vypínačů. Proud, na který je vypínač stavěný, vypařují materiál pouze s katody, při větších proudech oblouk mění svůj charakter. Roste obloukové napětí, roste iontový

proud, který dopadá na kovové stínění zhášecího prostoru. Anoda se začne zahřívat a vznikne anodová skvrna. V anodové části se zvětšuje spád napětí, zvětšuje se koncentrace částic plazmatu. Obloukový sloupec se vlivem silnějšího magnetického pole stahuje, tím se vlastně přestoupila vypínací schopnost zhášedla, nedojde tedy k vypnutí oblouku v nule proudu. Pro zvětšení vypínací schopnosti je nutné zamezení vzniku anodové skvrny, což můžeme docílit vhodnou volbou materiálu kontaktů (materiály s vyšší teplotou varu), úpravou tvaru kontaktů, použitím pomocného magnetického pole. Největším problémem u vakuových vypínačů je utržení proudu před průchodem nulou. Minimální proud nezpůsobí dostatečné odpaření kovů a oblouk přestane být stabilní. Proud zanikne na nulu (v řádu 10^{-8} s) a způsobí přepětí. Zabráníme tomu volbou vhodného materiálu katody nebo změnou tvaru katody. Do základního materiálu se přimísí materiál s vyšší tenzí par (dostatečné množství kovových par i při nižší teplotě katodové skvrny). Druhou metodou změníme tvar katody tak, aby se zmenšilo množství odváděného tepla z katodové skvrny do tělesa katody. [1], [2]

6. Omezovací schopnost jističe

6.1. Míra propuštěné energie

Energií, kterou jistič propustí rozumíme tu, která projde jističem od začátku působení (vznik zkratu) až do úplného přerušení obvodu (uhašení oblouku). Nejlepší vyjádření propuštěné energie popisuje Jouleův integrál

$$W = \int_0^t R \cdot i^2 dt \quad (1)$$

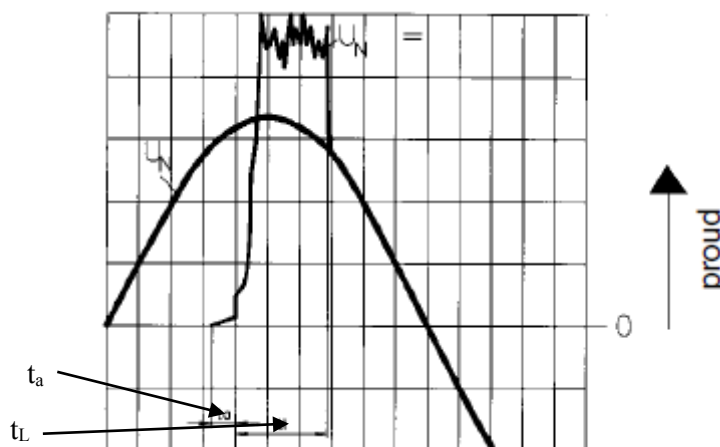
V praxi bývá ovšem problém s časovým průběhem proudu, který závisí na mnoha parametrech. Patří mezi ně vlastnosti elektrického obvodu, jistícího prvku, ale velkou roli zde hraje taky okamžitá hodnota napětí $u(t)$, při které ke zkratu došlo. Odpor R se rovněž mění po celou dobu poruchy a nezůstává konstantní. Zavádíme tedy upravený vztah, který nazýváme jako tzv. míra propuštěné energie. Je to časový integrál čtverce proudu, který prochází jistícím prvkem po celou dobu působení.

$$I^2 t = \int_0^t i^2 \cdot dt \quad (2)$$

Můžeme se setkat s tím, že tento vztah se rovněž označuje jako Jouleův integrál, i přesto, že zde neuvažujeme odpor R , a jednotkou není energie v Joulech, ale čtverce proudu sekunda (A^2s). Tento parametr se zařadil mezi hlavní údaje, které dnes udává většina výrobců jistících prvků. Velký význam má při navrhování jistícího prvku, kdy musíme dodržet podmínku aby $I^2 t$ toho prvku byla menší než $I^2 t$ zařízení, které chceme jistit.

Důležitost tohoto parametru můžeme dokázat tvrzením, že na špičkové hodnotě zkratového proudu jsou kvadraticky závislé elektrodynamické účinky, které mohou na zařízení způsobit značné škody. Z tohoto tedy vyplývá, že omezení špičky zkratového proudu může být velice žádané.

Hodnota $I^2 t$, kterou výrobce udává je vždy maximální hodnota, kterou může daný jistící prvek propustit za nejméně vhodných podmínek. Konkrétní hodnoty jsou dané normou. Tab. 1 [3], [6], [7]

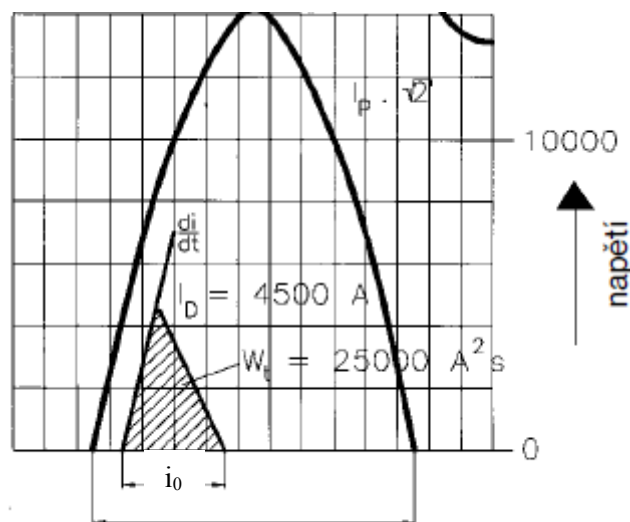


Obr. 6.1 - Průběh napětí

U_n - síťové napětí (V)

t_L - doba hoření oblouku (s) - cca 2 ms ($t = t_a + t_L$)

t_a - vypínací doba (s) - cca 0,7 ms



Obr. 6.2 - Průběh proudu

$i_p\sqrt{2}$ - maximální hodnota předpokládaného zkratového proudu (A)

i_0 - omezený proud (také i_D) – propuštěný proud jističem (A)

W_t – Míra propuštěné energie ($I^2t = \int i^2 dt$) – odpovídá ploše pod křivkou omezeného proudu i_0 (A^2s)

t - celková vypínací doba (s)

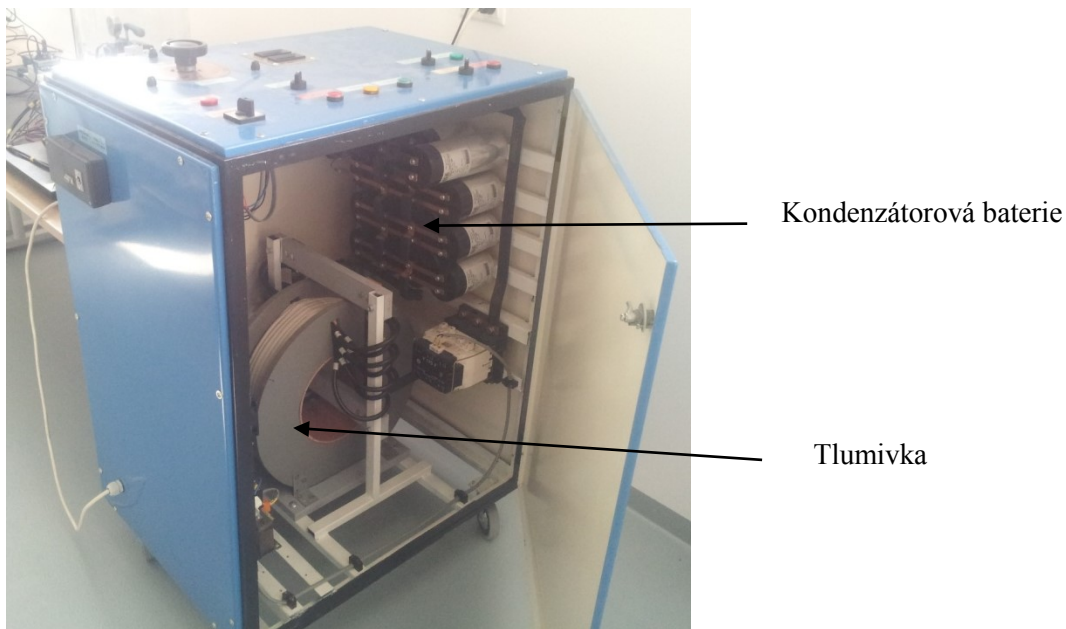
Tab. 1 - Tabulka hodnot povolené propuštěné energie dle ČSN EN 60 898+A

Jmenovitá zkratová vypínací schopnost (A)	Třída omezení energie				
	1	2		3	
	Max. I^2t (A^2s)	Max. I^2t (A^2s)		Max. I^2t (A^2s)	
	Vypínací charakteristika B a C	Vypínací charakteristika B	Vypínací charakteristika C	Vypínací charakteristika B	Vypínací charakteristika C
3000	Meze nestanoveny	31000	37000	15000	18000
6000		100000	120000	35000	42000
10000		240000	290000	70000	84000

7. Měření propuštěné energie

7.1. Postup měření

Vlastní měření probíhalo v laboratoři elektrických přístrojů. Jako zdroj byl použit zkratový generátor.



Obr. 7.1 - Zkratový generátor

Kondenzátorová baterie se nabije na napětí, které nastavíme pomocí autotransformátoru. Nastavujeme tedy velikost napětí, zkratový proud přímo nastavit nelze. Kapacita a indukčnost jsou sladěny tak, aby generátor generoval sinusový průběh o kmitočtu 50 Hz. Reálně se kmitočet pohybuje v rozsahu 49,5 Hz až 50,5 Hz. Maximální výstupní proud může být přibližně $I_{k\max} = 1,45 \text{ kA}$. Teoreticky vypočtená energie dodávaná kondenzátorovou baterií je přibližně $W_c = 1,5 \text{ kJ}$. Při měření byl generátor ovládán manuálně, přičemž se na pokyn obsluhy nabíla kondenzátorová baterie na požadované napětí a na další pokyn byl sepnut výkonový stykač, který pustil do obvodu zkratový proud.

Na výstupní svorky generátoru byla zapojena vakuová vývěva, ve které byl umístěn jistič LSE10B.

Aby bylo dosaženo nižšího tlaku vzduchu ve zhášecí komoře jističe, byl celý jistič umístěn do prostředí s nižším tlakem. Nevýhodou tohoto způsobu měření byla nutnost proces snižování tlaku po každém zapnutí jističe opakovat, protože nebyl k dispozici mechanismus, který by pracoval uvnitř vývěvy.



Obr. 7.2 - Vakuová vývěva s jističem

Měření proudu bylo provedeno klešťovým ampérmetrem Chauvin Arnoux PAC22, měření napětí přes odporový dělič. Pro převod do PC byla použita karta NI cDAQ-9172 od firmy National Instruments.



Odporový dělič

Obr. 7.3 - Klešťový ampérmetr

Pro účel snímání informací o proudu a napětí a následného přenosu do PC byla použita měřicí karta firmy National Instruments.

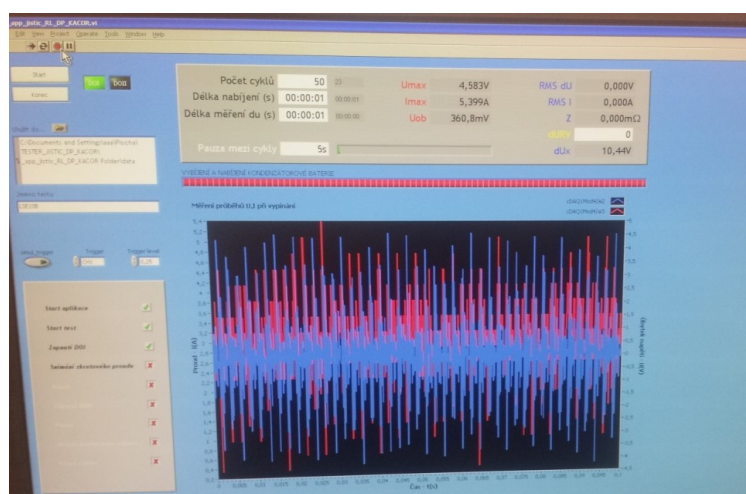


Napětí s odporového děliče

Klešťový ampérmetr

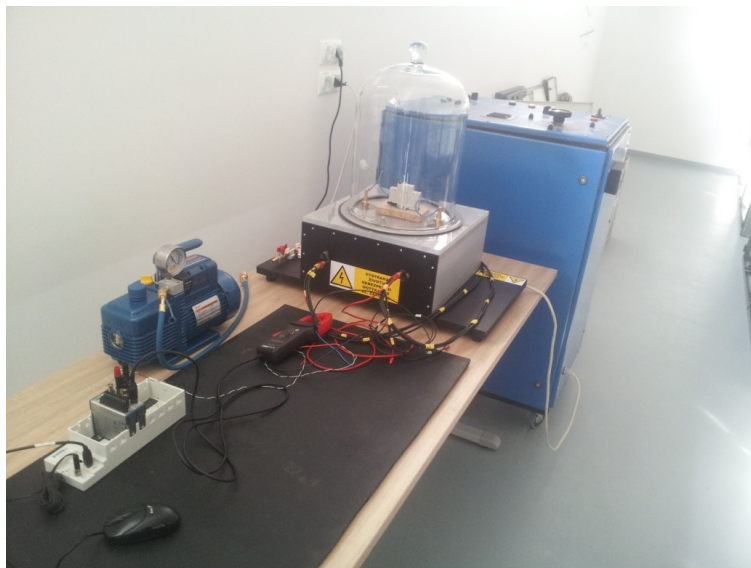
Obr. 7.4 - Měřicí karta National Instruments

Snímání a vyhodnocení dat, které do PC posílá měřicí karta bylo vyhodnoceno v softwaru LabView. Software plnil funkci záznamového zařízení.



Obr. 7.5 - Prostředí LabView

Měřicí ústrojí bylo umístěno tak, aby byla snadná obsluha všech přístrojů a byl celkový přehled nad všemi částmi.



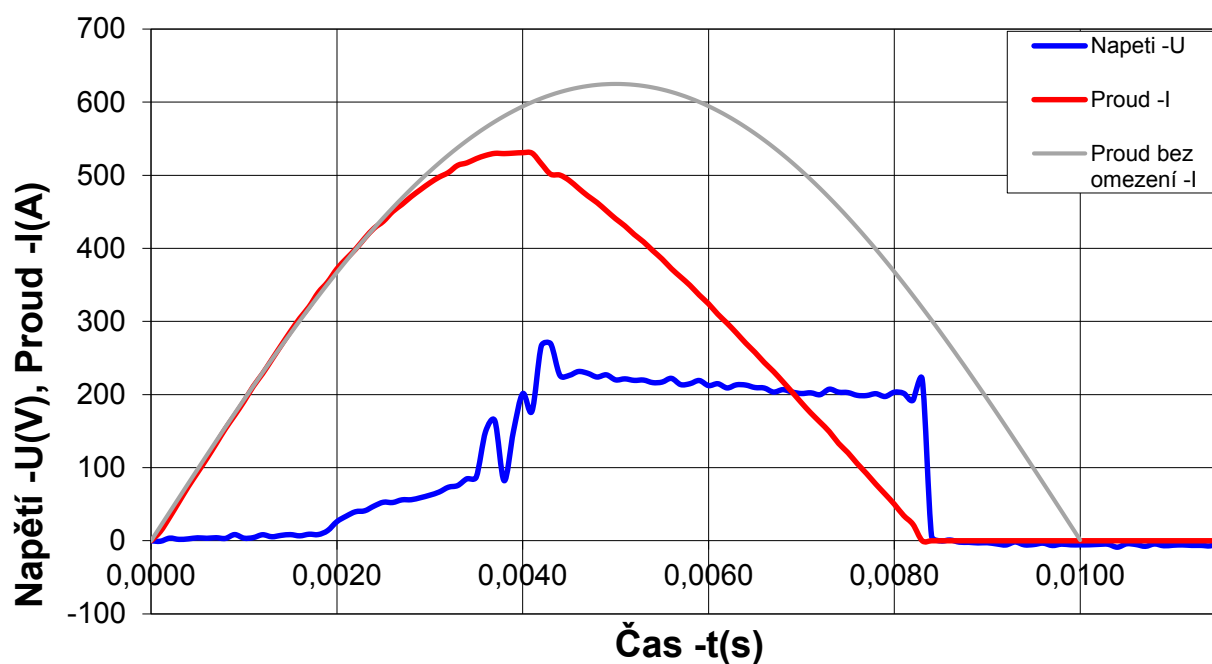
Obr. 7.6 - Celkový pohled na měřicí ústrojí

7.2. Vyhodnocení měření

Data byla vyhodnocována po měření v programu Microsoft Excel.

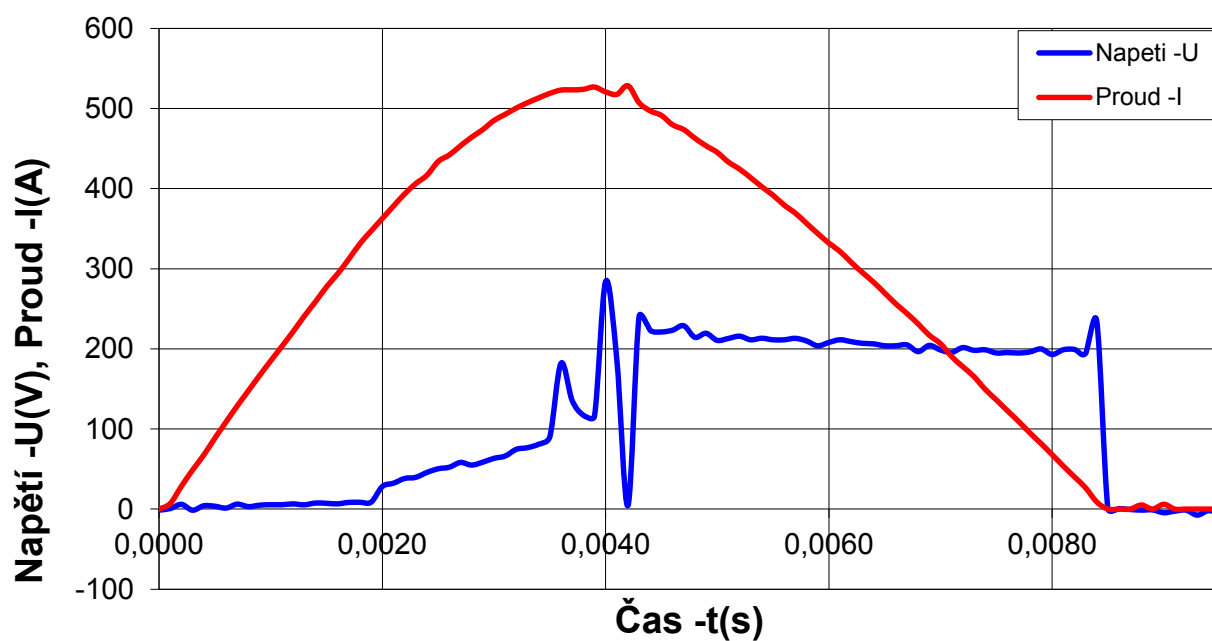
První měření zobrazené na Obr. 7.7 bylo provedeno při atmosférickém tlaku (budeme uvažovat 100 kPa). Aby mohl mít jistič omezovací schopnost, vycházíme s teorie:

Pokud se oblouk dostane do zhášecí komory, napětí na oblouku přesahuje 200 V. To způsobí, že jistič začne vykazovat omezovací schopnost a omezí špičku zkratového proudu. Šedou křivkou je znázorněn proud, který by obvodem prošel, kdyby v obvodu nebyl zařazen jisticí prvek. Půlperioda proudu při 50 Hz trvá 10 ms. Zkratový proud, který byl naměřen, prochází první nulo v čase 8,2 ms, což dokazuje, že jistič byl schopen přerušit proud, než dosáhl svého maxima. Plocha pod křivkou se tedy zmenší a omezí se energie, která jističem prošla.

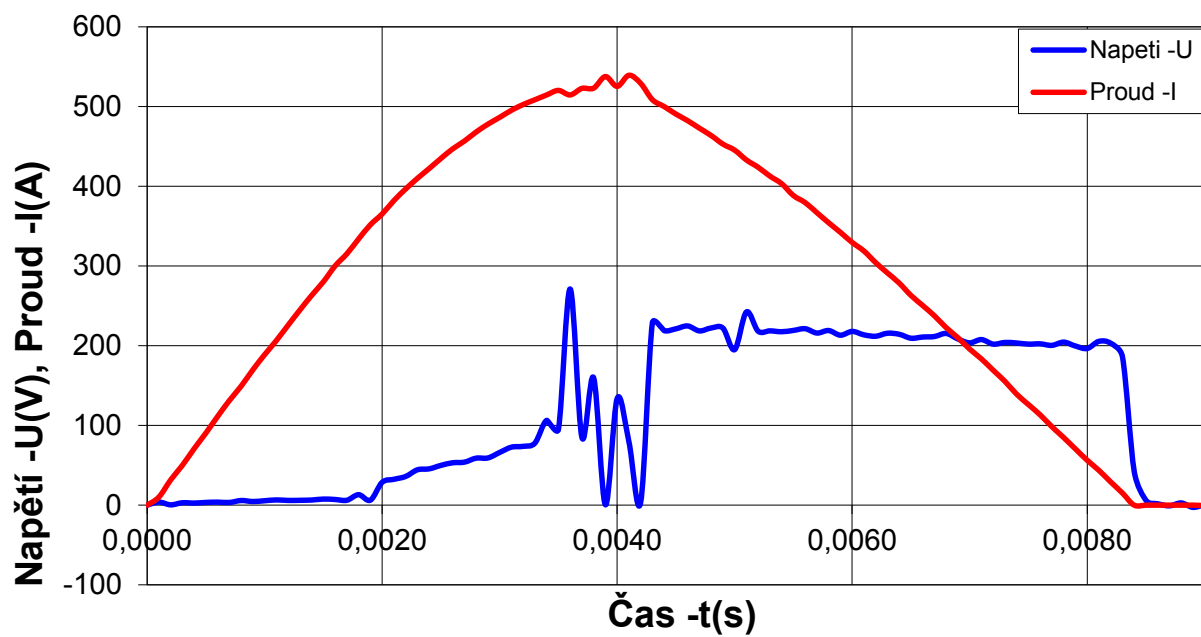


Obr. 7.7 - Průběh proudu a napětí na jističi při atmosférickém tlaku

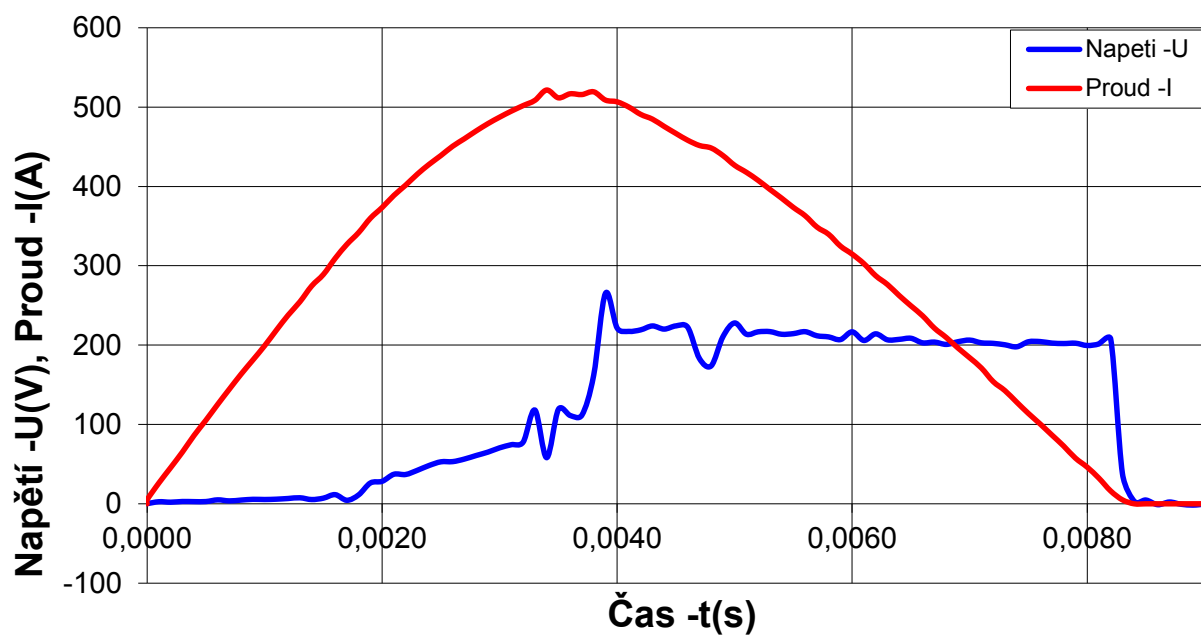
Při snížení tlaku na 90 kPa můžeme vidět velmi podobný průběh napětí i proudu. Proud prochází první nulou v čase 8,4 ms, což je pouze o 0,2 ms rozdíl oproti atmosférickému tlaku. Proud prochází první nulou v čase 8,3 ms. Napětí oblouku opět přesahuje 200 V.



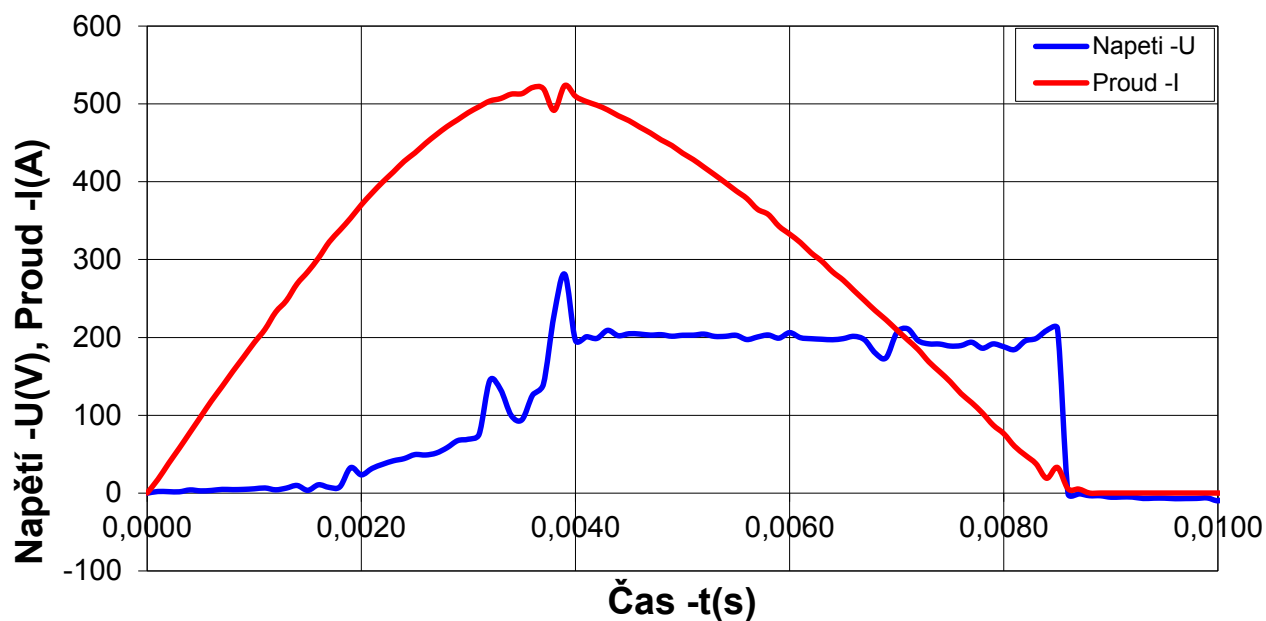
Obr. 7.8 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 90 kPa



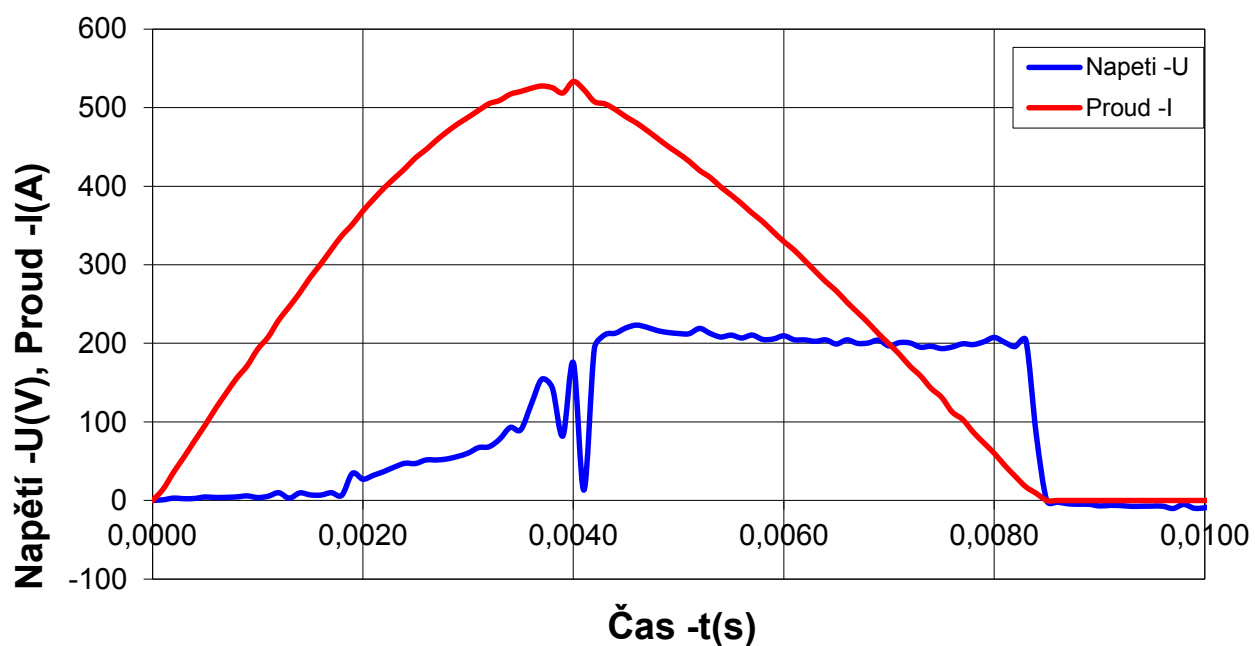
Obr. 7.9 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 80 kPa
Proud prochází první nulou v čase 8,7 ms.



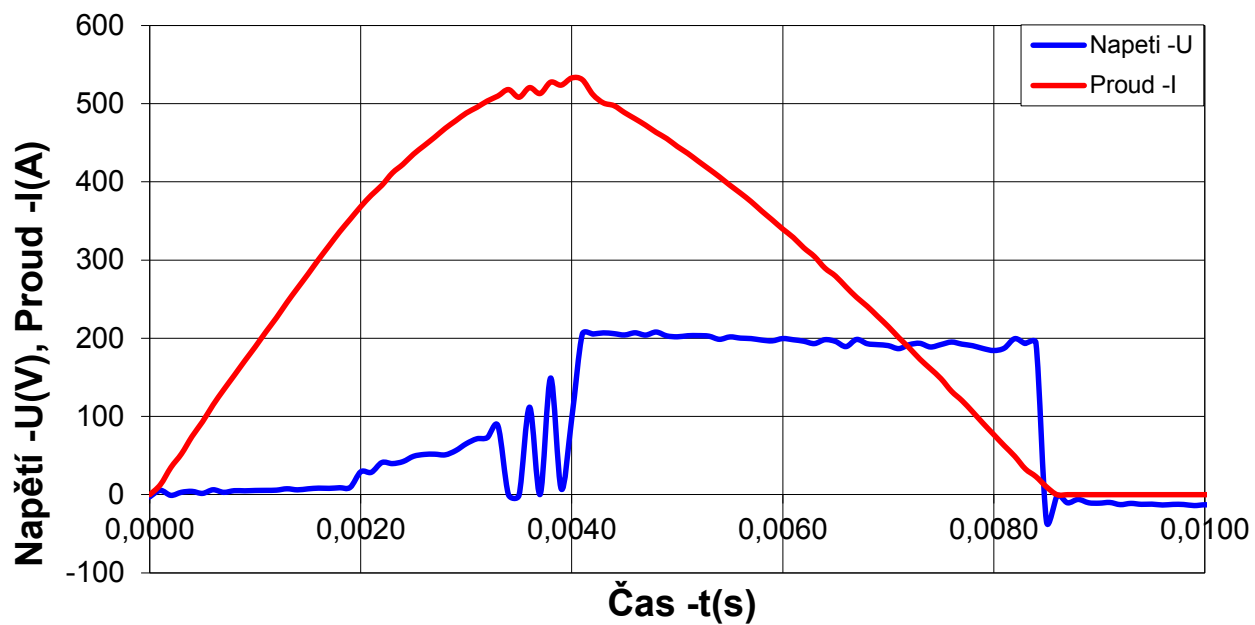
Obr. 7.10 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 70 kPa



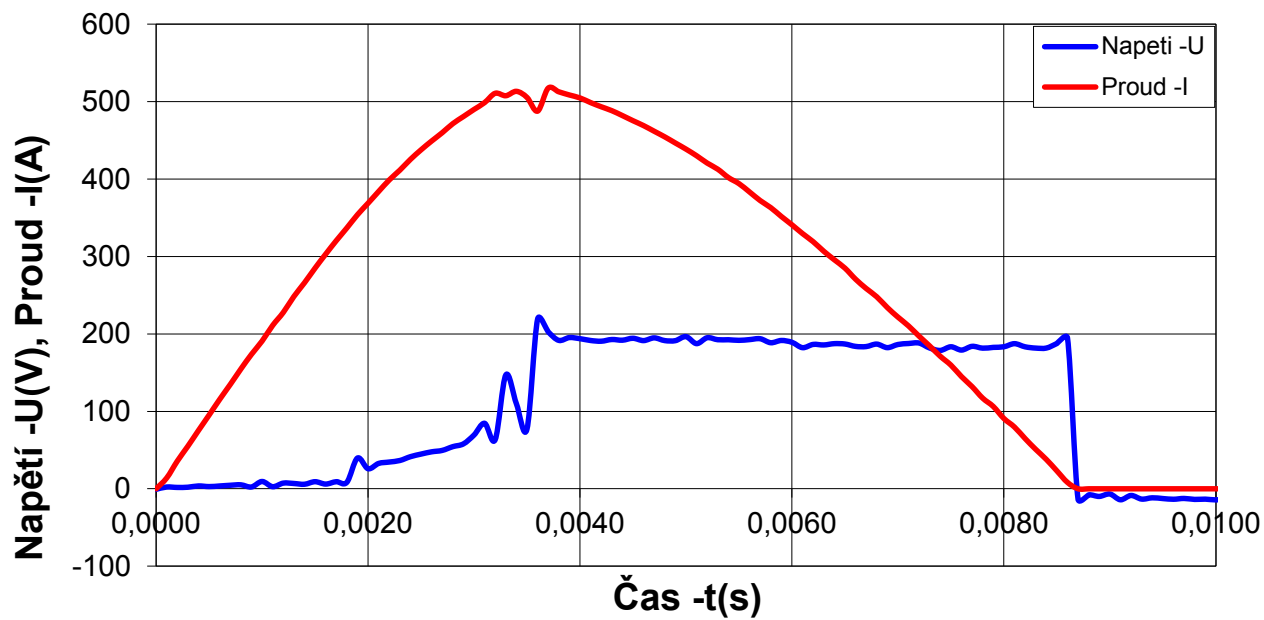
Obr. 7.11 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 60 kPa



Obr. 7.12 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 50 kPa

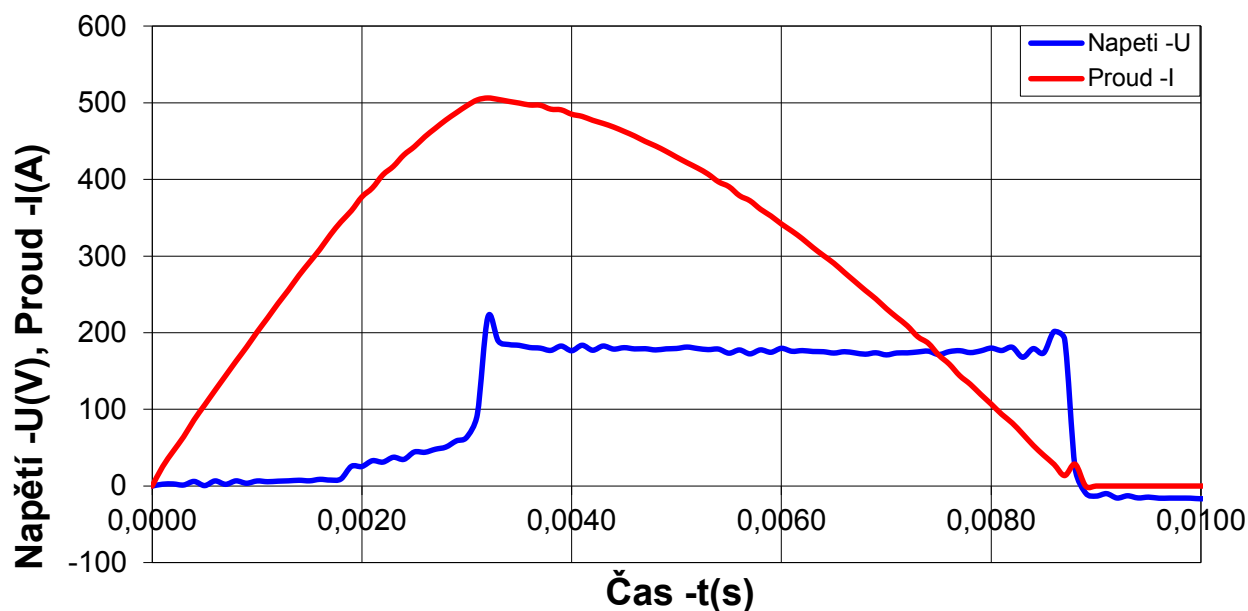


Obr. 7.13 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 40 kPa



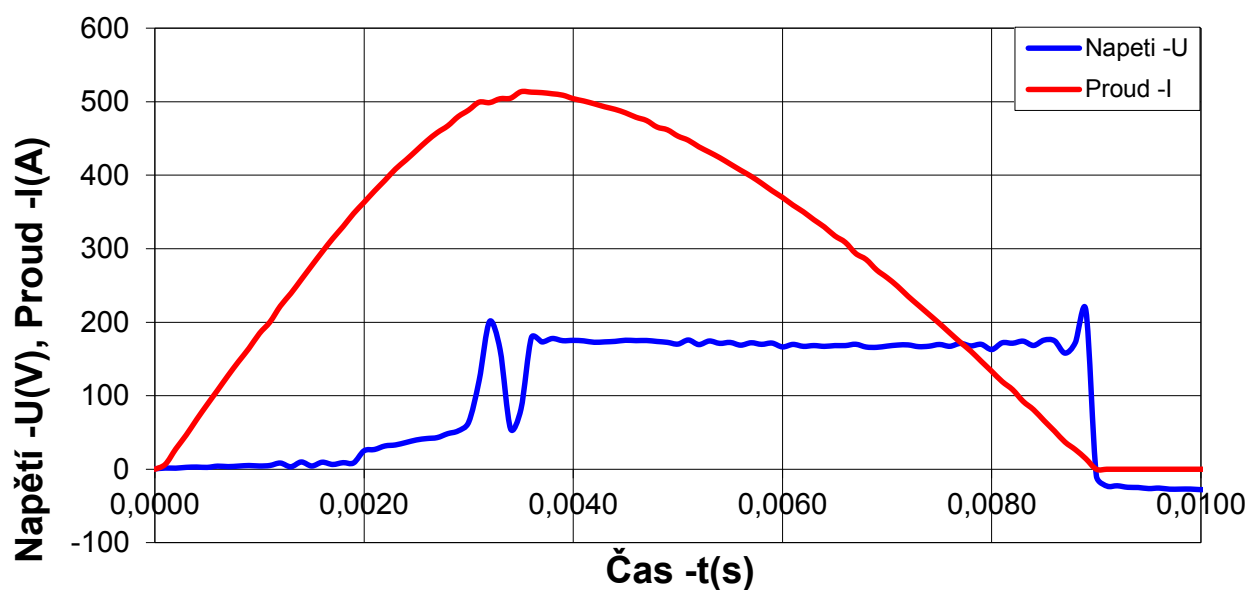
Obr. 7.14 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 30 kPa

Na následujícím grafu vidíme, že napětí oblouku již kleslo pod 200 V, ovšem proud prochází první nulou v čase 8,8 ms, proto můžeme pořád říct, že jistič má omezovací schopnost.



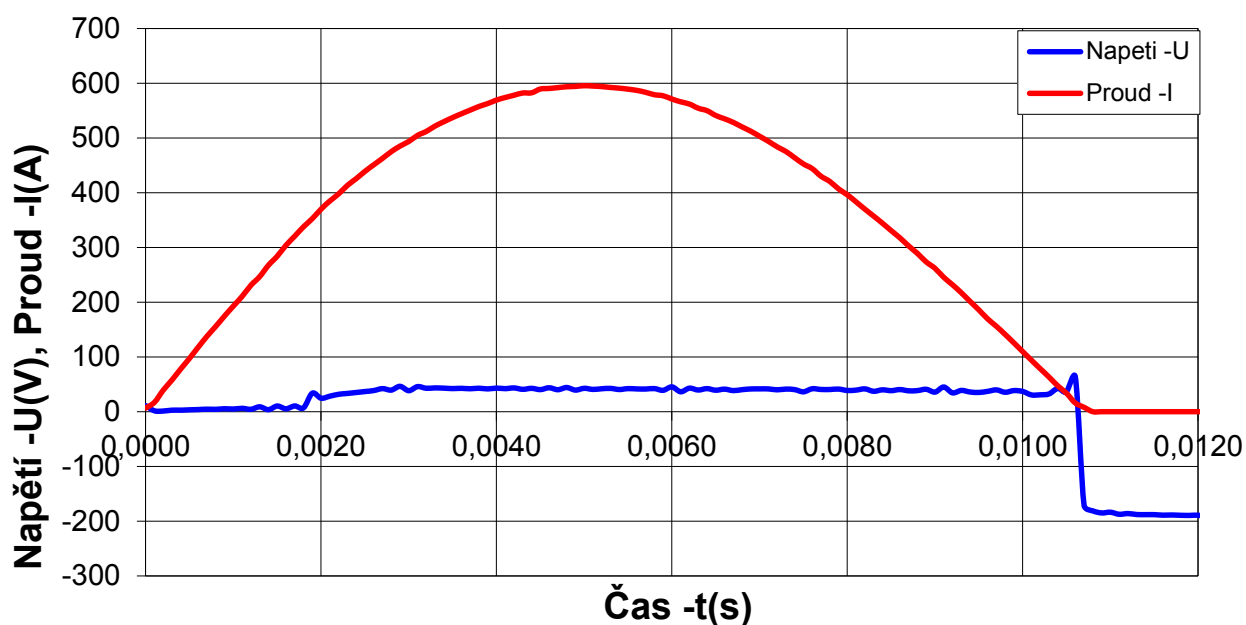
Obr. 7.15 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 20 kPa

Při snížení tlaku na 13 kPa se již napětí oblouku dostává na hodnotu 175 V. Snížení obloukového napětí znamená snížení omezovací schopnosti jističe.

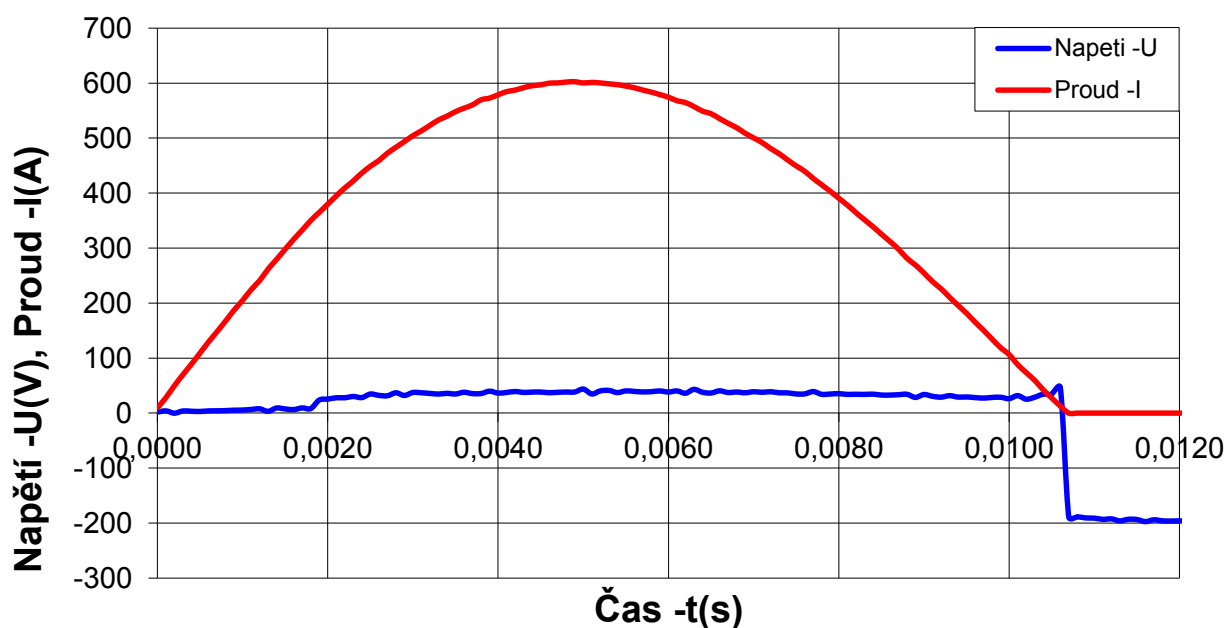


Obr. 7.16 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 13 kPa

Při snížení tlaku na 10 kPa se napětí na oblouku nedostane přes 50 V. Takové malé napětí není schopno vytvořit omezovací schopnost. Proud projde první nulou v čase 10,7 ms, což je čas, ve kterém by proud prošel bez omezení, protože púlperioda proudu s $f=50$ Hz trvá 10 ms. Vidíme také, že proud dosahuje vyšší amplitudy. Stejné výsledky můžeme také pozorovat při nejnižším možném tlaku, kterého jsme dosáhli, tedy 2 kPa.



Obr. 7.17 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 10 kPa

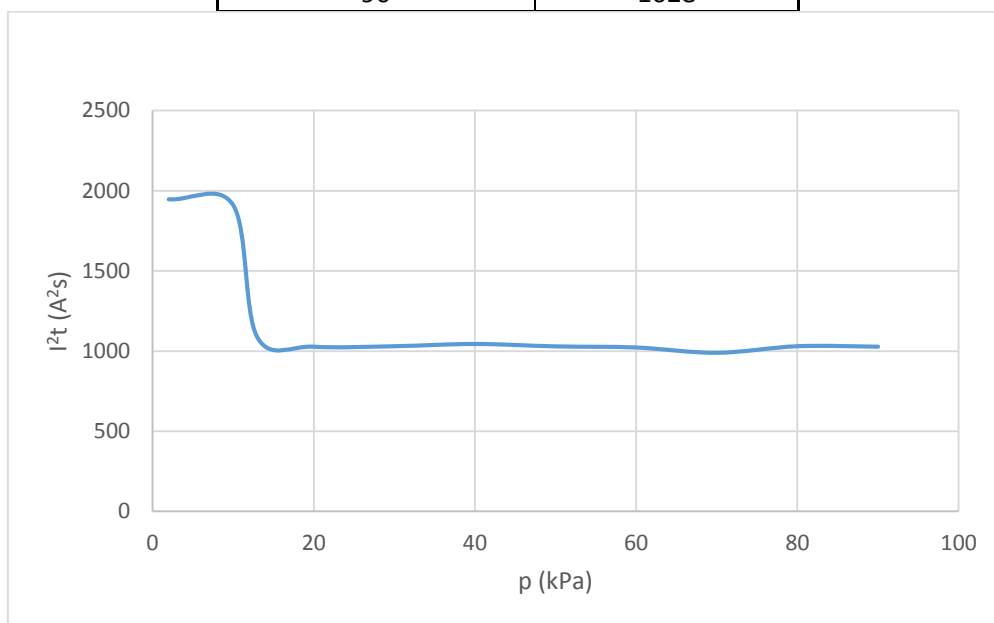


Obr. 7.18 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 2 kPa

Pro srovnání naměřených výsledků si uvedeme míru propuštěné energie při všech měřeních.

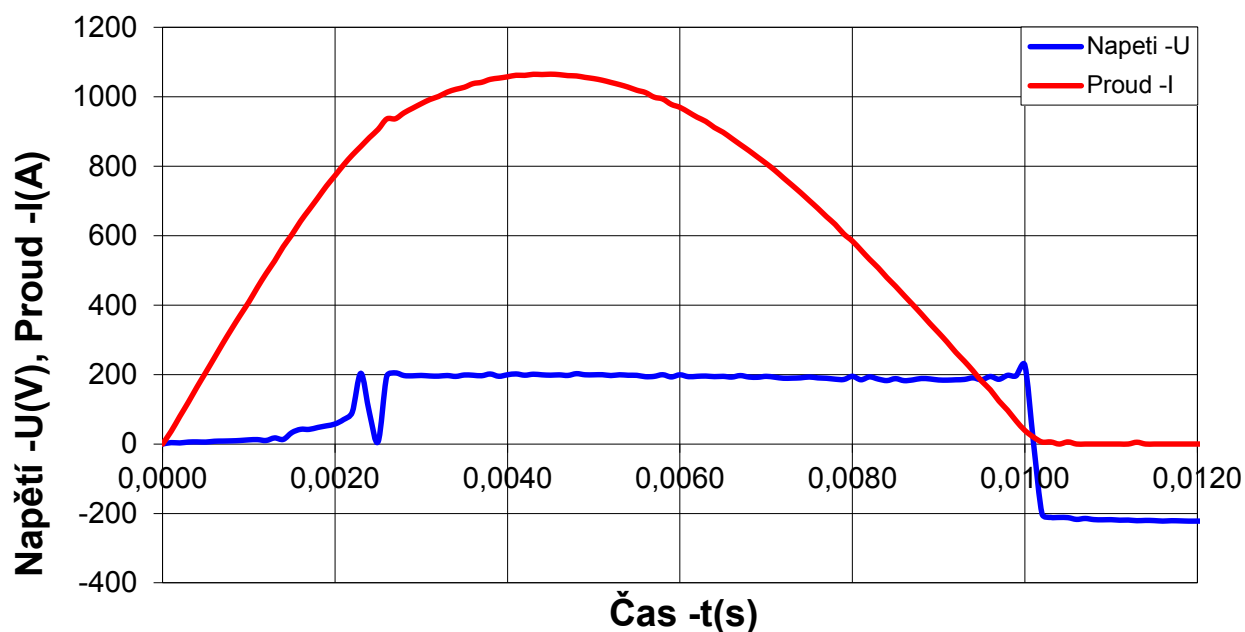
Tab. 2 - Závislost propuštěné energie na tlaku vzduchu

Tlak vzduchu (kPa)	I^2t (A ² s)
2	1947
10	1911
13	1086
20	1028
30	1031
40	1045
50	1030
60	1023
70	990
80	1031
90	1028



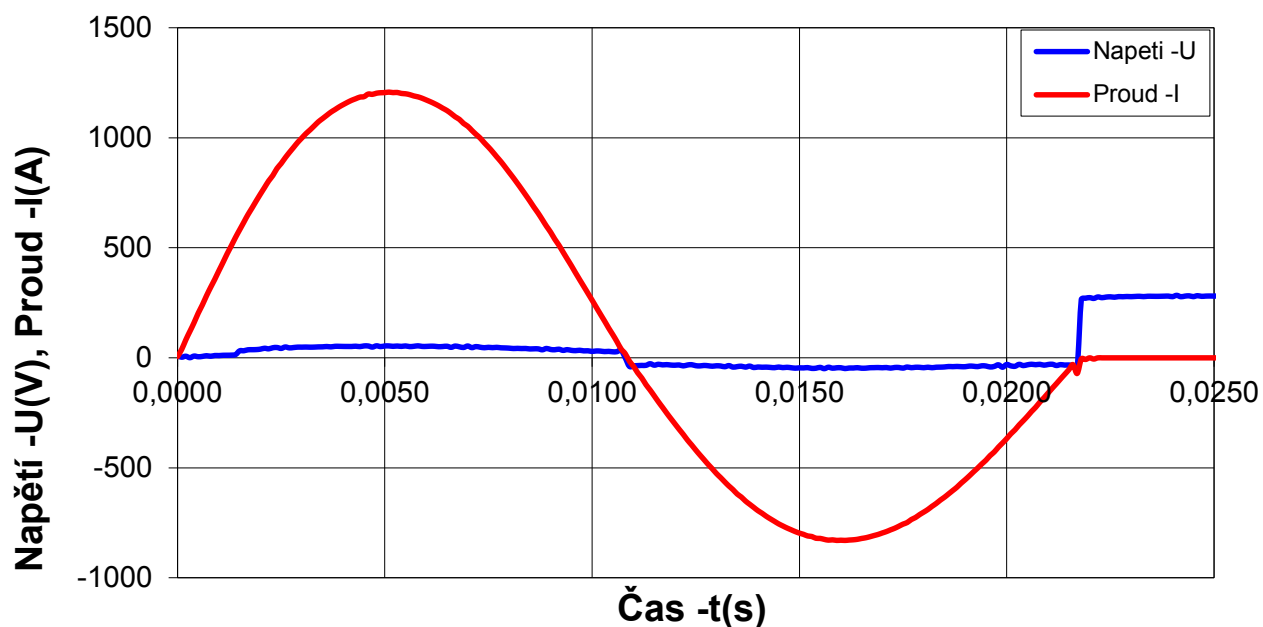
Obr. 7.19 - Energie propuštěná jističem v závislosti na tlaku vzduchu

Při posledních dvou měřeních byl zkratový generátor nastaven na maximální možné napětí, tedy i na maximální možný proud. Nejdříve byl tlak nastavený na 13 kPa, protože při tomto tlaku jistič ztrácí omezovací schopnost. Proud dosáhl amplitudy 1065 A, prochází první nulou v čase 10,1 ms, což dokazuje, že nebyl schopen omezit špičku proudu a to i přesto, že napětí oblouku dosáhlo 200 V.



Obr. 7.20 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 13 kPa a maximálním proudu, 1,2 kA

Při posledním měření bylo nastaveno opět maximální napětí a zároveň maximální možný podtlak, tedy 2 kPa. Při tomto zkratovém proudu a tlaku vzduchu vidíme, že jistič již nebyl schopen vypnout proud při průchodu první nulou. Můžeme tedy říct, že jistič selhal. Maximální zkratový proud byl 1,2 kA. Míra propuštěné energie byla programem spočítána na 11840 A²s.



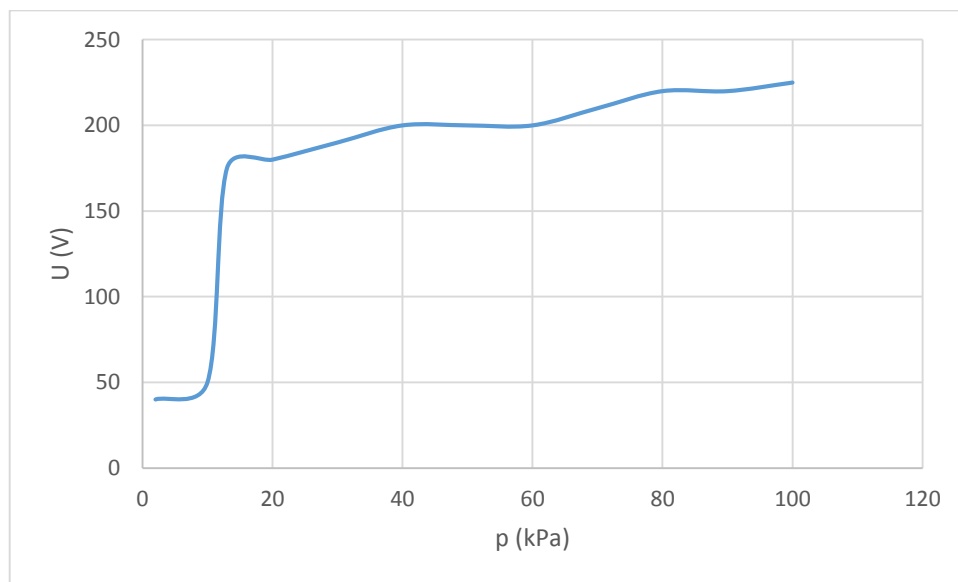
Obr. 7.21 - Průběh proudu a napětí na jističi při tlaku 2 kPa a maximálním proudu, 1,2 kA

8. Zhodnocení měření, závěr

Celkově bylo při snížené hodnotě napětí a zkratového proudu nastaveno 12 různých tlaků vzduchu od atmosférického tlaku po tlak 2 kPa, což je minimum, které bylo možné s naší vakuovou pumpou dosáhnout. Tlak byl snižován po 1 kPa, kromě tlaku 13 kPa. V okolí tohoto tlaku byl zaznamenán zlom, kdy je schopen jistič omezovat špičkovou hodnotu zkratového proudu a kdy už ne. Podle grafu míry propuštěné (Obr. 7.19) energie můžeme tedy říct, že jistič vykazuje skokovou závislost na tlaku vzduchu. Při měření s maximálním možným zkratovým proudem bylo zjištěno, že jistič při tlaku 2 kPa již není schopen vypnout proud v první nule, přesto že amplituda dosáhla hodnoty 1,2 kA a běžné jističe tohoto typu by měly zvládnout amplitudu zkratového proudu 6 až 10 kA (Obr. 7.21). Z toho zjištění můžeme říct, že snížení tlaku vzduchu jističi výrazně zhoršuje vypínací a omezovací schopnost. Dokázali jsme tím, že vakuové jističe nejsou schopny vykazovat omezovací schopnost, protože pracují s nízkým obloukovým napětím.

Po zhodnocení tohoto měření můžeme tvrdit, že důležité vlastnosti každého jističe jsou závislé na tlaku vzduchu, ve kterém se právě nachází. Malý vliv na funkčnost každého jističe tedy může být například počasí, velký vliv zde ovšem sehrává nadmořská výška. Obecně se udává do 5 000 metrů nad mořem pokles tlaku asi 800 Pa na každých 100 výškových metrů. Například ve výšce 3000 m, ve které se ještě běžně vyskytují jističe malých i velkých výkonů se tlak pohybuje okolo 70 kPa. Nadmořská výška, ve které bude jistič pracovat, se tedy stává důležitým faktorem. [8]

Na Obr. 8.1 můžeme pozorovat, jak se ve zhášecí komoře mění napětí při různých změnách tlaku vzduchu. Skokový zlom obloukového napětí nastává při tlaku 13 kPa, tedy při tlaku takovém, u kterého jsme zjistili, že jistič přestává vykazovat omezovací schopnost. Dokazujeme tím závislost omezovací schopnosti jističe na obloukovém napětí.



Obr. 8.1 - Závislost obloukového napětí na tlaku vzduchu

Pokud se sníží hodnota obloukového napětí při snížení tlaku vzduchu, začíná se vyskytovat doutnavý výboj. Vycházíme z teorie, že snížíme-li tlak vzduchu, zvětšíme střední volnou dráhu molekul a pro výboj tak stačí nižší hodnota napětí. Doutnavý výboj vzniká při tlaku $1-10^3$ Pa. Takového tlaku jsme v našem měření nedosáhli, k doutnavému výboji jsme se tedy jenom přiblížili. Nízkého obloukového napětí využívají skutečné vakuové vypínače.

Po zhodnocení této práce se tedy snižování tlaku vzduchu jeví pro jistič jako velká nevýhoda z hlediska jeho omezovací schopnosti. Při minimálním tlaku, kterého jsme dosáhli, tedy 2 kPa, nemůžeme ještě uvažovat výhody vakuových vypínačů, které jsou popsány v kapitole 5.1. Zkoumáním chování jističe při dalším snižování tlaku by mohlo být tématem pro rozšíření práce, stejně jako podrobnější zkoumání bodu, kdy jistič přestává vykazovat svou omezovací schopnost. Hlavním přínosem této práce bylo dokázání teoretických předpokladů o chování elektrického oblouku při sníženém tlaku vzduchu a závislosti míry energie propuštěné jističem na obloukovém napětí.

9. Literatura

- [1] O. Havelka a kol., *Elektrické přístroje*, SNTL/Alfa, Praha/Bratislava, 1985
- [2] L. Cigánek, *Elektrické přístroje*, SNTL, Praha, 1956
- [3] *Možnosti výkonových jističů pro 21. století* [online]. 5.10.2011 Dostupné z <<http://elektrika.cz/data/clanky/moznosti-vykonovych-jisticu-pro-21-stoleti>>
- [4] MINDL, Pavel. *Aplikace elektrických přístrojů (2.)* [online]. 22.3.2004 Dostupné z <<http://elektrika.cz/data/clanky/dddmzs040322>>
- [5] Katalogové listy, katalogy firmy ABB. [online]. © Copyright 2016 ABB. Dostupné z <http://www.abb.cz/ProductGuide/?_ga=1.14459639.1988546114.1461143940>
- [6] FALTUS, Ivo. *Výklad a praktický význam parametrů jisticích přístrojů a odpínačů nn.* [online]. 08/2005. Dostupné z <<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vyklad-a-prakticky-vyznam-parametru-jisticich-pristroju-a-odpinacu-nn--13510>>
- [7] KŘÍŽ, Michal *Zkratové proudy, základní veličiny, jejich výklad. Požadavky na ochranu před zkratovými proudy. Příklady výpočtu.* [online]. 30.1.2013 Dostupné z <<http://www.in-el.cz/?t=201&p=103020>>
- [8] *Atmosférický tlak.* [online]. © 2007-2016. Dostupné z <<http://www.meteocentrum.cz/zajimavosti/encyklopedie/atmosfericky-tlak>>